

# 长江三峡工程重大科技问题研究

张光斗<sup>\*</sup>潘家铮<sup>\*\*</sup>

(清华大学 北京 100084) (电力工业部 北京 100031)

**提要** 本文对长江三峡工程中有关地质、泥沙、机电设备、船闸及升船机、施工技术、生态与环境影响等重大科技问题的研究,作了高度概括的介绍。

长江三峡工程的重大科技问题研究大体上经历了四个阶段:

第一阶段是 1956 年至 1970 年。研究工作主要是围绕编制三峡工程 190—200 米方案的初步设计要点报告进行的。当时科研工作由国家科委、中国科学院、水利部组成领导小组进行;重点为人防和水库泥沙问题。

第二阶段是 1971 年至 1983 年。在此期间,研究工作的重点是围绕长江葛洲坝工程的修建,积累在长江上筑坝的经验,同时编制三峡工程 150 米方案的可行性报告。

第三阶段是 1984 年至 1990 年。三峡工程 150 米方案的可行性报告审查后,由于存在不同意见和建议,国务院决定重新论证三峡工程的设计水位方案。1986 年,水利电力部邀请了 412 位专家,组成 10 个课题组,14 个专家组,开展了广泛的科研工作。

第四阶段是 1991 年至现在,国务院三峡工程审查委员会通过了工程的可行性研究报告,七届人大五次会议通过了将三峡工程建设列入国家社会经济发展的十年规划,国务院三峡工程建设委员会原则批准了三峡工程的初步设计报告。从 1991 年以来,三峡工程的各项科研工作就是围绕如何使三峡工程的建设在经济上更合理、技术上更落实,使很多工程科技问题的解决达到进一步优化的目的。

下面就三峡工程的重大科技问题的研究作一介绍。

## 一、地质问题

三峡工程主要的地质问题有区域稳定性、水库诱发地震和库岸稳定性三个方面。

### (一)区域稳定性

中科院、水利、地矿、地震等部门经过多年来大规模勘察、试验和计算,并应用地震测深法探查深部地壳完整性,进行了遥感图像解译和详尽的地面调查。研究表明,三峡工程的大地构造背景属于中国大陆较稳定的扬子准地台的中西部,位于地壳相对比较稳定的地区。对坝址所在黄陵结晶地块的周缘有几条较大的断裂,都已采用多种手段和方法做了全面深入的调查,属于弱活动或不活动断裂。

国家有关地球物理和地震部门前后经过 4 次鉴定,都将工程所在地区的地震基本烈度定

• 中国科学院院士、中国工程院院士、清华大学教授。

•• 中国科学院院士、中国工程院院士、中国工程院副院长。

为 VI 度。三峡工程的主要建筑物系按 VII 度设防,在抗御地震破坏方面留有充分的余地。为了收集更多的地震资料,工程区周围的 7 个地震台将进行长期的地震监测,对于黄陵地块周缘和几条较大断裂将继续进行变形测量和活动性的研究,列入了“八五”科技攻关课题中。

## (二) 水库诱发地震

由中科学院、水利、地矿、地震等部门进行研究,对水库诱发地震的可能性、地点、强度及其对工程和环境的影响等得出了基本一致的结论。三峡库区的三个库段,地形地质条件差异很大,因而水库诱发地震的评价也各不相同。坝址—庙河为结晶岩库段,岸坡低缓,河谷较开阔,无区域性或活动性断裂通过,历史至现今地震活动微弱,岩体坚硬完整,透水性弱,不具备发生较强水库诱发地震的条件。但蓄水后,不排除诱发类似我国乌溪江及美国蒙蒂赛洛水库发生过的 3 级左右浅源小震的可能。庙河—白帝城库段,碳酸盐岩广泛分布,河谷深切,基岩裸露,岩溶发育,秭归—渔洋关和黔江—兴山两个小地震带分别于坝址上游 17—30 公里和 50—110 公里穿越本库段,有发生断层破裂型诱发地震的可能。预计两处,可能诱发地震的最大级不超过 6 级,影响到三斗坪坝址的烈度在 IV 度范围内。白帝城以上库段,为低山丘陵地形,出露地层主要为中生代砂岩、粉砂岩、泥岩,岩性较软弱,岩体透水性弱,构造条件简单,地震活动微弱。除支流乌江和嘉陵江回水范围的石灰岩分布区,有产生岩溶型小震的可能性外,一般不具备发生水库诱发地震的条件。水库诱发地震问题,除了已有地震台网监测以外,在“八五”期间仍将继续进行研究。

## (三) 库岸稳定性

地矿部、中科院及水电部有关单位,湖北、四川两省的地矿部门在三峡库区做了大量的工作。采用了一些最先进的手段和方法,如航空遥感、涌浪模型试验和计算、稳定性灵敏度分析、变形体形变监测等。三峡水库岸坡主要由坚硬、半坚硬岩石组成,断层不多,新构造运动和地震也不强烈,因而总的稳定性较好。调查结果,干流库段全长 1300 公里的岸坡,稳定条件好和较好的库段占 90%,稳定条件较差的约占 8.2%,而真正稳定条件差的岸坡,加起来总长只有 16 公里,仅占库岸总长的 1.2%。在总数 140 个体积大于 100 万立方米崩塌滑坡体中,现在正在活动的有 8 个,现在稳定性较差、蓄水后在库水影响下可能失稳的有 14 个,就是说蓄水后少数稳定性差的崩塌、滑坡体可能复活,但是并不改变库岸稳定性的基本现状。对崩塌滑坡失稳滑落入江后,会造成什么影响和危害,曾逐项做了分析:

1. 滑坡滑下后,不会形成天然的滑坡坝,堵塞长江。

2. 三峡水库形成后,由于江面拓宽,水深加大,在天然条件下入江的碍航滑坡在新的情况下就不再碍航。

3. 22 个现在活动和蓄水后可能活动的滑坡分布在 1300 公里的库岸上,总体积只有 3.8 亿立方米,只占 145 米水位以下库容的 2.2%,对水库的库容及寿命没有影响。

4. 由于坝前 26 公里范围内不存在可能失稳的大型滑坡体,因而任何大型岸坡失稳都不会直接威胁水工建筑物的安全。至于滑坡入江涌浪的间接影响,曾对规模大、距坝最近的新滩滑坡和链子崖危岩体进行涌浪试验和计算,结果表明,假定新滩滑坡有 1600 万立方米物质入江,涌浪向下游衰减很快,到坝前最大浪高只有 2.7 米,不至于形成对水工建筑物安全威胁。

为了减少突然发生滑坡时的损失,“八五”期间将开展对各滑坡体的监测工作和整治的可行性研究。

## 二、泥沙问题

泥沙问题是备受关注的重点研究课题。30多年来,由长江水利科学院、水利部水利水电科学院、南京水利科学院、清华大学等进行了大量研究工作,规模之大和深入程度史无前例。曾经研究过的和今后进一步研究的问题包括以下几个方面:

### (一) 水库长期使用问题

基于三峡水库的特点,采用“蓄清排浑”的水库调度原则,在多沙的汛期一般尽量使库水位保持为很低的防洪限制水位 145 米,在汛期过后的 10—11 月再将含沙很少的来流蓄至正常水位 175 米,在枯季不使库水位降至枯季消落低水位 155 米以下,至次年汛前又再将库水位降至防洪限制水位 145 米。模型试验和数学模型计算表明,这种根据三峡水库迳流量大库容相对甚小的特点采用的调度方式,可以充分发挥水库防洪、发电与航运效益,而且使防洪限制水位至正常蓄水位之间的绝大部分有效库容不致淤失,在科学上也是一项突破性的进展。

数学模型曾用长江葛洲坝水库、汉江丹江口水库、荆江人工裁弯后河道冲淤实测系列资料进行验证,然后用于三峡水库泥沙冲淤计算,计算成果和结论是可靠的。

### (二) 水库变动回水区和航道、港区问题

采用原型观测调查、数学模型计算和泥沙模型试验相结合的研究途径,开展了系统的大规模研究工作;并在重庆等河段开展泥沙运动和河道演变实地观测,并兴建了模拟河段长 300 公里的三峡水库大模型。研究表明,三峡工程建成后,由于水深增加,600 公里水库区内的险滩淹没水下,航道条件有很大改善。但水库汛后需要蓄水,缩短了重庆河段汛后冲沙的时间,致使第二年水库水位消落时,重庆市的某些港区将出现边滩,影响港口的正常作业。研究也表明,这一问题可以通过优化水库调度,结合港口的改造和疏浚来加以解决。但是,优化调度方式以增加冲沙时间,需要推迟蓄水的进度,从而会损失部分电量,改造港口则需要较大的投资,而利用挖泥船疏浚,则和港口作业有一定干扰,因此,在“八五”攻关的研究计划中,列入了综合研究重庆港区边滩淤积的课题,以期获得进一步优化的解决方法。

### (三) 坝区泥沙问题

坝区泥沙淤积对三峡枢纽通航建筑和电站的正常运行有重要关系,目前有三个大型泥沙模型在进行研究。初步研究表明,由于三峡工程有较大的库容,在运用初期约 30 年内,坝区的泥沙淤积不至于造成对通航和发电的不利影响。但到运用后期(70—80 年),船闸进口的流速将有较大增加,引航道内也将产生较大的碍航淤积,这些都是不利于航运的因素。因此,目前各研究单位正集中力量研究坝区泥沙淤积的发展过程和船闸引航道的布置问题,以保证在不同运用时期内,万吨船队可以顺利地通过船闸。

#### (四) 枢纽下游的河道冲刷问题

三峡工程建成后拦蓄泥沙 150 多亿立方米,因此将引起宜昌以下河道长时期和长距离的冲刷,冲刷引起的问题包括以下几方面:

1、冲刷引起葛洲坝工程下游水位下降,将导致三江船闸下闸坎和航道水深不足,影响船队通航。

2、冲刷使宜昌下游的某些卵石浅滩上下游落差增加,形成急流险滩,需要进行整治。

3、冲刷可能使荆江河势发生变化,导致堤防防守重点改变,同时使堤防的根石走失,需要增加险工堤防的保护。

4、冲刷使荆江水位降低,分入洞庭湖的流量减少,这将增大武汉河段的洪水流量,同时也改变了长江中下游防洪规划中分配洪量的基础条件,需要重新修改规划。

由于三峡工程一旦截流,下游河道立即发生冲刷,上述问题亦将随之而产生,急需研究对策。因此,以上课题均已列入“八五”国家重点攻关项目和三峡工程专项技术设计的计划内,目前正积极进行中。

#### (五) 三峡工程的入库泥沙数量

在可行性研究阶段,三峡工程采用的年入库沙量为 4.62 亿吨(其中推移质不到 100 万吨),系 50 年代以来的多年平均值。实际上,根据长江流域规划和国民经济发展的趋势看,三峡工程建成后的 30—50 年内,长江上游干支流上必将有一批大型水库建成并投入运用,这些水库将拦蓄泥沙,减少进入三峡水库的沙量,改善三峡水库的泥沙淤积状态。因此,在初步设计中,考虑了不同建设进程的三种方案,分析和计算了长江干支流水库对三峡水库淤积的影响。分析表明,即使按照较慢的建设进程,上游水库拦沙对减少三峡水库淤积的影响是十分显著的。由于上述分析方法还有待改善,同时,为了更合理地估计上游水库对三峡水库淤积影响,本课题也列入了“八五”攻关计划。

### 三、船闸及升船机科学研究

#### (一) 五级船闸

经与其他方案的比较,三峡工程初步设计中选定了连续双线五级船闸的通航建筑物方案。五级船闸全长 1600 米,位于左岸,在岩体中开挖,闸室用薄混凝土衬砌,输水廊道采用岩体隧洞。船闸的主要工程技术问题是:船闸两侧岩体高边坡的稳定性、船闸水力学、船闸衬砌结构和船闸的金属结构问题。

1、船闸两侧开挖边坡最高达 170 米,一般在 100 米以下,地应力为 6—7 兆帕。经过地质力学模型试验,二维和三维有限元计算和块体平衡计算,边坡整体滑动稳定安全系数均大于 1.5,局部不稳定块体的体积较小,采用锚固支护后预计可以保证边坡稳定安全。由于岩体的微小变形会严重影响船闸闸首的正常运用,关于岩体变形对船闸闸首的影响还需要作进一步深入的研究。

2、船闸水力学的问题是指船闸输水廊道的空蚀问题。五级船闸总水头 113 米,两级之间



最大水头为 45.2 米,超过了国内外已建单级船闸水平。经过水力学整体模型和减压模型的试验表明,采用降低廊道高程和优化廊道体型等措施后,阀门段的空化数大于临界空化数,可以避免发生空蚀。充泄水时,也能够满足闸室船队的停船条件。

3. 闸墙薄衬砌结构,利用岩体作支撑,闸室采用厚 2.0 米的薄混凝土衬砌墙,闸墙以锚杆与岩体紧密联接,光弹、石膏模型试验及有限元计算(并参考美国帮纳维尔船闸等已建结构物经验)表明结构安全经济。锚杆布置,岩体变形对结构物影响正在作深入研究。

4. 船闸的金属结构和机械设备方面的主要研究课题是:大淹没水深人字闸门的启闭型式,优化布置,启闭力试验和抗扭特性以及高水头充泄水阀门的水力特性研究等。初步研究表明,这些问题都能解决,“八五”期间要进一步研究,加以落实和优化。

## (二) 升船机

为了解决施工期通航和正常运用时客货轮过坝,三峡枢纽中还布置了一座提升力为 12000 吨的升船机。升船机用承船厢湿运船只过坝,有效尺寸为 120 米×18 米×3.5 米(长宽深),可通过 3000 吨级客货轮一条或 1200 马力顶推轮和 1500 吨驳船各一条,提升高度 113 米,是世界上规模最大的升船机。三峡升船机为一级钢丝绳卷扬式全平衡垂直升船机,主要设备有钢结构承船厢、主提升机械和平衡重系统,另外还有上、下闸首的金属结构和启闭设备。

“七五”期间开展了系统的攻关科研,共有总布置方案、升船机总体动态、承船厢结构和附属设备,主提升机械、土建结构、电力拖动及自动控制等十个专题共 37 个子题,并已于 1992 年先后完成,通过了国家鉴定和验收;大量成果为初步设计提供了科学依据。为确保三峡升船机建设一次成功,三峡建设委员会与有关部门协调后,决定选择业已开工,并预计 1996 年建成的清江隔河岩水利枢纽的 300 吨级垂直升船机作为三峡升船机的中间试验工程,深入研究三峡升船机的主要技术问题并作实战准备。

“八五”期间在机械设备方面的科研工作主要是:进行综合“七五”攻关成果,研究三峡升船机的整体动态数学模型和配合技术要求设计的要求进行主提升系统的机械动力学,液压平衡系统动态试验,直流电机同轴拖动出力均衡的技术优化,承船厢动力和稳定分析,设备可靠度评价等课题的研究。

## 四、机电设备技术研究

长江水利委员会、国内机电设备制造工厂、电力部门、高等院校、科研院所等单位,在三峡工程机电设备技术方面做了大量科研攻关、可行性论证和规划设计工作,积累了丰富的试验研究和规划设计成果。根据三峡工程初步设计的审查意见,三峡电站采用单机容量为 70 万千瓦的混流式水轮发电机组,共 26 台,总装机容量 1820 万千瓦,年发电量 842 亿度,是世界上最大的水电站。水轮机转轮直径 9.8 米,重 500 吨,发电能力轴承负荷为 5900 吨,均属世界最高水平。三峡电站电力主要供给华中、华东地区,小部分供给川东。电站输电线路暂定交流 500 千伏 13 回,直流±500 千伏 1 回。左、右岸电厂均需建交流 500 千伏开关站,右岸电厂还需建一座±500 千伏,送电量 240 万千瓦的直流换流站。电站的监测控制采用先进的微机系统,通信采用卫星、光纤、微波及自动程控交换等现代通信方式。经过多年论证研究,认为迄今选定的方案是可行的,只要对国内工厂进行必要的技术改造,引进部分先进技术,三峡工程机电设备的制造和供应可以主要立足于国内。国家经贸委组织开展的机电重大装备的“八五”攻关项目

中,包括了水轮发电机组的参数优选、水轮机模型设计及试验、水轮机结构、材料和加工工艺、电机推力轴承与冷却方式和电站自动化及通信等研究课题。关于三峡工程电力系统规划和运行关键技术研究等 5 个专题,已列入国家科委的“八五”攻关计划中。

## 五、施工技术研究

三峡工程主要工程量为:土石方开挖约 1 亿立方米,混凝土浇筑量约 2700 万立方米,金属结构约 27 万吨,是世界上规模最大的水利水电工程。在三峡工程的施工组织设计中,主要的技术问题有下列几个方面:

### (一) 施工导流和施工通航方案

为了保证施工期的长江航运和尽可能提前发电,经过大量研究工作,包括水工模型试验、网络图、关键路线、动态经济分析等,决定采用三期导流、明渠通航和用碾压混凝土围堰挡水发电的施工方案。围绕这个方案,还需要研究和落实三期施工时的坝体导流孔和闸门设计、安全渡汛等一系列技术问题。

### (二) 二期深水土石围堰

二期深水土石围堰是施工中的一个关键项目。设计要求在 60 米水深的条件下修建最大高度达 80 米的土石坝,上下两个围堰总填筑量为 1200 万立方米,围堰内还需要填筑面积达数万平方米的高质量混凝土防渗墙。二期围堰的研究课题包括三个方面:一是材料研究,对围堰基础和填料性质及防渗墙的材料和结构型式进行试验;二是围堰在各种工作条件下的应力和变形状况;三是对混凝土防渗墙施工技术和施工设备的研究。研究成果基本上满足了施工要求。目前正结合三峡工程右岸一期围堰进行现场试验,以取得经验。

### (三) 土石方开挖及爆破技术

三峡工程土石方开挖量大、施工强度高、要求严格,例如:170 米高边坡开挖,近百万平方米的基础面开挖,大洞室的地下开挖等,都需要利用国内外的先进工程爆破技术。近年来,在国内许多大型水利水电工程的工地上,进行了大规模的现场试验,创造和发展了预裂爆破、光面爆破、毫秒差爆破、基岩保护层一次爆破、建筑物拆除爆破等一整套先进技术,将可以广泛地应用于三峡工程,并需要加以总结提高。

### (四) 混凝土工程施工技术

三峡主体混凝土浇筑量达 2700 万立方米,最高年浇筑量达 410 万立方米,最大月浇筑强度为 46 万立方米,这三个指标在国际上是最高的。国家“七五”和“八五”攻关课题中,研究了一整套适合三峡工程的混凝土施工方案和配套设备,如大型和特大型混凝土搅拌楼、大型门塔式起重机、混凝土施工专用皮带机、侧卸式混凝土料罐运输车、大型平仓振捣机械、月生产 20 万吨以上的特大型预冷混凝土生产系统等,都已获得了有价值的成果。还研究了仓面面积 2000 多平方米的薄层长块通仓浇筑施工工艺,碾压混凝土的设计和施工方案。今后还要结合施工进一步深入研究。

## 六、生态与环境的影响研究

在三峡工程可行性研究阶段,曾经组织了中科院、水电部和高等院校等 40 多个单位,对生态与环境影响进行了广泛而深入的研究,国家科委把三峡工程对生态与环境影响及其对策列为“七五”国家重大科技攻关课题。对三峡工程生态与环境综合评价的结论是:三峡工程综合效益巨大,对生态与环境有有利的和不利的影 响,大多数在采取对策和措施后可以减免,生态与环境问题不影响工程建设的决策。国家环保局批准了三峡工程生态与环境影 响评价报告,指出:本着对人民负责、对子孙负责、对历史负责的精神,对不利影 响必须予以高度重视,严格执行环保法规,采取得力措施将其降低到最小程度。目前已进行了下列研究工作:

### (一) 水质保护

三峡水库水质的直接污染源主要来自重庆、涪陵、万县等成都市,其中重庆市的污染负荷量占总量的 90% 以上。经过研究表明,从总体上来说,三峡水库的水质仍可达到国家规定的Ⅱ类标准,可以满足各类用水的要求。但在污染负荷大的城市沿江水域,建库后因流速减小,江水自净能力降低,岸边污染带的污染程度将会加重,影响工业和人民生活用水的质量。初步设计提出:在三峡水库水质保护工作中,要坚决执行“谁污染、谁治理”的原则,排入水库的污水浓度要满足国家规定的污水排放标准,水库建成后由于流速减小影响水质达标而需要治理的部分,则由国家给予补偿,根据以上原则估算保护水质的补偿投资费用为:

1. 初期蓄水位运行时,水质补偿费为 1.3 亿元,列入三峡工程建设费。
2. 正常蓄水位运行时,水质补偿费为 1.1 亿元,计入三峡电站发电成本。

对于防止三峡水库水质污染问题还需进一步研究落实。

## （二）物种保护

三峡工程的水库淹没、径流调节和移民搬迁对库区和下游的某些陆生植物和水生生物产生影响,需要采取一定的保护措施。

#### 四、机电设备技术研究

、长江水利委员会、国内机电设备制造厂、电力部、烹飪院、花柳病研究所、宜昌连沱川明參保护点等，古大樹种资源拟挑选 199 株作为重点保护对象。

对珍稀水生生物的保护是通过保护其栖息地和人工繁殖放流等措施实现的。计划建设四个自然保护区,一个半自然保护区和建立三个人工繁殖放流站。前者为保护对象提供较好的自然生存环境,后者则通过人工繁殖一定数量的苗种,向长江放流,以达到恢复、补充种群数量的目的。保护对象包括国家列为一、二级保护的珍稀水生动物共 6 种,其中有白鲟、中华鲟、长江鲟、胭脂鱼、白臀豚等。

物种保护的经费部分由国家科研拨款,部分列入工程建设经费,电厂发电后列入发电成本,工程建后的运行费用亦计入发电成本。

### (三) 库区的环境容量问题

三峡工程水库淹没涉及湖北、四川两省 19 个县。城乡居民 72.5 万人(1984 年),到水库建成时将超过 100 万人。水库移民计划就地安置,因此,当地环境能否承受,是一个重要问题。

按 1984 年统计,库区平均每平方公里 251 人,人均耕地 1.5 亩,其中坡地占 60%以上,垦殖程度已经很高,人均收入约为全国水平的一半,是我国贫困地区之一。从移民的环境容量看,突出问题是可耕地资源严重不足。专家们指出:水库建成后,库区缺粮可能达到 4—5 亿斤,需要由国家负责从库区外调入,其中一半是城市人口用粮,本来要由国家供应。专家们建议:对于库区的经济发展,要调整农业结构,耕地种粮必须不破坏生态环境,不强调粮食自给,积极发展柑桔、油桐、药材等经济林木,积极种树种草,发展畜牧业和渔业。同时根据当地资源条件,发展污染少的加工工业、旅游业等第三产业,吸纳移民。要严格控制人口增长,发展文化教育,改变知识结构。做好开发性库区移民,是能够改善人民生活和改进库区生态环境的。除去施工期提供移民的经费外,电站发电后,在每度电费中提取 3 厘钱补助库区,50 年不变。

对有关的科技问题,要进一步抓紧进行研究。

### (四) 文物古迹保护和三峡景观问题

川江东联吴楚,西接巴蜀,是两大区域文化交往和经济交流的重要通道,保留着不少文物古迹。根据多年调查,受三峡水库中淹没影响的文物有 44 处,其中国家级保护的文物一处,省级五处,县级的十余处,目前对于这些文物都已陆续制定搬迁、保护的计划和具体实施的办法。例如著名的张飞庙,已由清华大学建筑系进行了全面测绘,准备将来可以不失原貌地迁建到新地方去,关于文物古迹的保护问题要进一步调查研究,加以落实。

长江三峡西起奉节白帝城,东迄宜昌南津关,全长 192 公里,两岸高峰摩天、群山叠翠,以“雄、奇、幽、险”闻名于世。修建三峡工程后,水位抬高几十米至百余米,由于两岸陡峻,水面宽度增加很少,三峡两岸山峰峰顶大多在海拔 1000 米至 1100 米。如最享盛名的神女峰顶高 900 米,巫峡十二峰都在 1000 米上下,水面抬高几十米,人们在视觉上将只有很小的变化,因此可以说,在三峡工程修建后,“奇峰秀色不减,峭壁雄风犹存”,三峡将不减当年本色。另一方面,三峡水库建成后,险滩急流将转化成平静的人工湖,回水所及的支沟河岔,将成为新的景点,“高峡出平湖”,三峡将成为更加吸引人们的旅游胜地是可以预期的。